

離岸堤による人工岬の形成手法

宇多高明*・小 俣 篤**・横山 揚久**

1. はじめに

現在、突堤や離岸堤が海岸侵食対策工法として広く用いられている。これらの構造物が沿岸漂砂の卓越する海岸に設置される場合、一般には海岸線に沿って、ある間隔で数多く構造物が造られることになる。しかし、それらは沿岸漂砂を完全に阻止するものではないために、静的に安定な海浜を形成させることができない。一方、これらの工法を用いると構造物が海岸に沿って多く造られるため、景観を悪化させることも考えられる。また、最近では河川や崖などから海岸へ供給される土砂量が減少しているために、これまでのような海浜の動的意味での安定化より一歩進んで、静的に安定した海浜を形成させることが必要となってきた。加えて環境面でも景観を損ねない工法が望まれている。

自然海浜の消波効果を有効に利用して海浜を静的に安定させる試みとして、土木研究所でも人工岬工法について検討している¹⁾。この工法は陸上より移動限界水深付近までの長さを持った構造物を設置し、延長の長い海岸線をポケットビーチに分けることにより、海浜を静的に安定化することをめざしている。一方、移動限界水深付近に設置した離岸堤背後に安定したトンボロが形成されれば、トンボロが岬になることによりポケットビーチ化される。したがって、必ずしも人工構造物により岬を建設しなくても人工岬の実現は可能と考えられる。

本研究の目的は、波が直角入射する条件の下で離岸堤背後に安定なトンボロを成長させて人工岬を形成する手法について検討することにある。このためトンボロの形成に必要な離岸堤諸元について実験的に検討した。ただし、以下には堤体自体を離岸堤と称するが、トンボロと一体化させることにより、全体として人工岬工法と呼ぶことができる。なお、ここでいうトンボロとは離岸堤まで達した砂州のことのみにいう。

2. 実験方法

実験には幅 26 m、長さ 26 m の平面水槽を用いた

(図-1)。模型海浜は平均粒径 $d_m=0.28$ mm の砂を用いて整形し、横断方向に様々な斜面を初期地形とした。斜面勾配は 1/10 と 1/30 の 2 ケースとした。離岸堤の設置位置、すなわち離岸距離は一樣勾配海岸の場合設置水深に規定される。安定海浜を形成させるために構造物の沖側では漂砂移動が生じてはならず、したがって構造物の設置水深は少なくとも移動限界水深とする必要がある。よって、離岸距離は波や地形、底質の条件により決まることになる。そこで、実験では離岸距離を固定し、離岸堤長を変えてトンボロが形成されるのに必要な堤長を求めた。その結果よりトンボロの形成限界付近の堤長と十分長い堤長の 2 ケースを選び、地形変化、波高分布、流況等を調べた。波浪条件は沖波換算波高が $H_0'=4.6$ cm、周期が $T=1.27$ 秒である。予備実験の結果より、ほとんど等深線の動かない水深 12 cm の地点を移動限界水深と想定し、同地点を離岸堤設置位置とした。

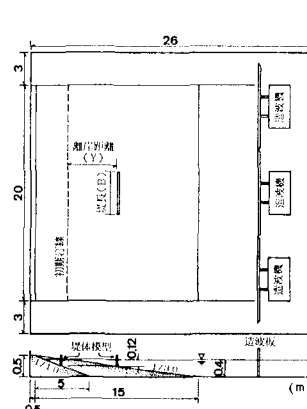


図-1 平面水槽の概要

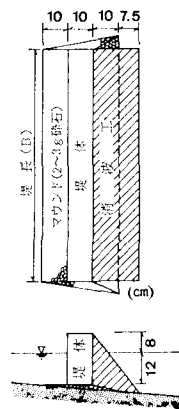


図-2 離岸堤形状

表-1 実験条件

CASE	i	Y (m)	B (m)	H_0 (cm)	T (sec)
I-1	1/10	1.35	2.8	4.2	1.26
I-2	1/10	1.35	3.6	5.8	1.34
II-1	1/30	3.75	3.8	4.4	1.25
II-2	1/30	3.75	5.0	4.4	1.25

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

離岸堤模型には不透過ブロックを用い、幅 30 cm の砕石マウンドを敷設した上に設置した (図-1, 2). また、波の反射を抑えるため、沖側に異形ブロックの消波工を設置した (図-2 参照). 実験条件を表-1 に示す. 測定項目は砕波波高分布、ビデオ撮影による砕波波向分布、フロート追跡による流況測定、および海浜地形測定である.

3. 離岸堤による人工岬形成の条件

自然海浜には、岬に挟まれたポケットビーチが存在する. 多くのポケットビーチは、数 100 m ~ 数 km 離れた岬に挟まれた弓形の形状を持つ安定した海浜となっている. ポケットビーチの一例を写真-1 に示す. 同写真の海岸は京都府の上野平海岸であり、島状の岩礁背後に形成されたトンボロに挟まれたポケットビーチが存在する. 岬間の距離は約 1 km, ポケットビーチ最奥部から岬の先端までの距離は約 250 m である. このように海岸近くの小島や岩礁の背後にも、島や岩礁の大きさによっては安定したトンボロが存在でき、そこが岬となってポケットビーチが形成される. この島や岩礁を人工構造物 (離岸堤) に置き換えてトンボロの形成機構を考察する.

篠原らの実験²⁾を参考にすると、離岸堤背後に形成される舌状砂州は堤長と離岸距離により大きく 3 パターンに分類される (図-3). I 型は先端が尖った 1 山の砂州, II 型は先端が平坦な台形型の砂州, III 型は中央部がくぼんだ 2 山の砂州が形成されるパターンである. 離岸距離を固定すると、堤長を長くするにつれ砂州形状は I → II → III 型と変化する. これらの砂州形状は主に離岸堤背後に形成される循環流に支配されていると考えられる. II

型では循環流が堤中央付近にまで及ばず、その結果砂州先端部での砂の移動量が減少するため平坦な形状になる. III 型では堤中央部は静穏となり、両側の各々の循環流により運搬された砂が独立に砂州を形成する. III 型の状況では堤背後中央部で砂の移動は生じず、砂の供給があればそこに砂は留まるはずである. よって、養浜、または斜め入射の条件下で生ずる沿岸漂砂による堤背後への砂の供給があれば、トンボロは形成され则认为られる. このことから、II 型となる堤長、離岸距離の条件がトンボロ形成の限界条件に当たると考えられる. 以下このときの堤長を限界堤長と呼ぶ.

海底勾配 $i=1/30$ の条件で離岸堤を設置し、その堤長 B を変化させた場合の汀線変化を図-4 に示す. 離岸距離は $Y_d=3.75$ m である. $B=2.6$ m の場合、砂州先端位置は $Y=0.9$ m にある. $B=3.2$ m では $Y=1.3$ m に増加し、I 型の砂州を形成した. $B=4.0$ m では $Y=1.25$ m に減少したが、砂州先端部は平坦になり、砂州の沿岸方向の幅が広がった. $B=4.6$ m, 5.2 m と長くなっても砂州先端位置に変化は見られず、砂州の沿岸方向の幅が広がるのみであった. これらのことより、このケースでは堤長約 4.0 m の条件下では、養浜により砂を供給すればトンボロが形成され则认为られる. この結果よりトンボロ形成限界の堤長を $B=3.8$ m 付近と考え、 $B=3.8$ m と 5.0 m の堤長を設定した.

同様に、 $i=1/10$ の条件での離岸堤設置による汀線変化を図-5 に示す. $B=1.0$ m から 2.0 m へと堤長が延びるにしたがい、I 型の舌状砂州が成長したが、 $B=$

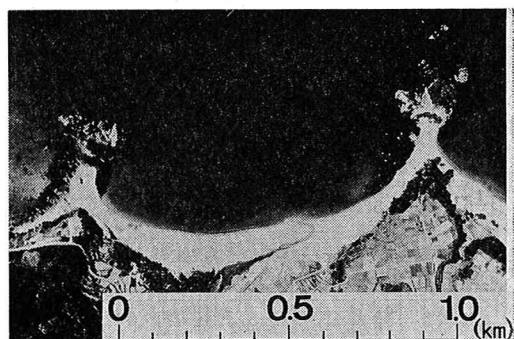


写真-1 ポケットビーチの一例

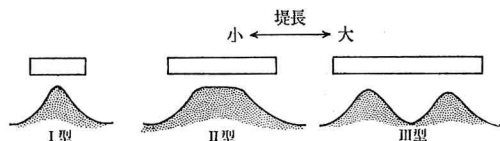


図-3 舌状砂州のパターン

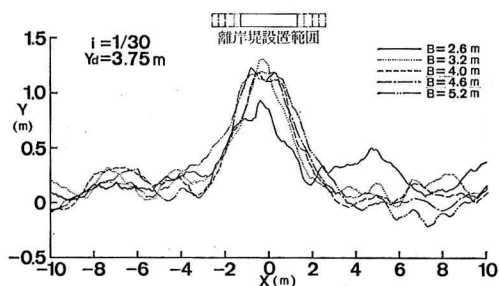


図-4 砂州形状の変化 ($i=1/30$)

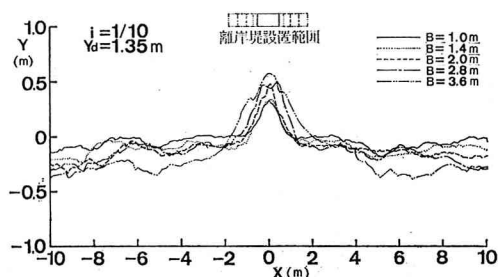


図-5 砂州形状の変化 ($i=1/10$)

2.8 m になると先端位置は変わらず、Ⅱ型とⅢ型の中間的形状となった。さらに、 $B=3.6$ m では砂州の沿岸方向の幅が大きく増加した。以上のことより、このケースではトンボロ形成限界の堤長を $B=2.8$ m として、 $B=2.8$ m と 3.6 m の堤長を設定した。

4. 本実験の結果

実験は初期安定海浜が形成された後に離岸堤模型を設置し、海浜が安定するまで波を作用させ、海浜の安定後に離岸堤背後に養浜を行い、さらに波を作用させるという手順で行った。波の作用時間を表-2 に示す。

$i=1/30$ の条件で堤長 $B=5.0$ m と長いケースにおいて、堤体設置後、地形が安定した時の等深線図を図-6 に示す。離岸堤背後には砂州が形成され、 $Y \approx 0.2$ m にあった初期汀線位置より、汀線は最大約 1 m 前進した。その汀線形状はⅡ型であるが、砂州先端部の平坦域が広いので、Ⅲ型に近いと考えられる。地形変化は -8 cm の地点まで顕著であるが、-12 cm の等深線はほとんど

表-2 波の作用時間

項 目	造波時間 (hr)	
	ケースⅠ	ケースⅡ
初期安定後	2	4
堤体設置安定後	10.5	18
養 浜 後 1	1	1
2	1	3
3	1.5	5
4	2.5	8

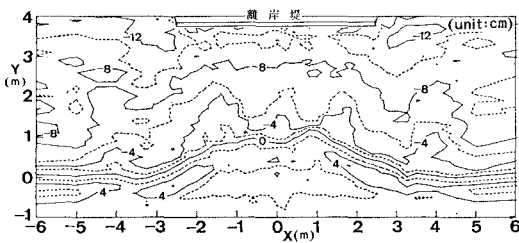


図-6 堤体設置安定後の等深線 ($i=1/30$, $B=5.0$ m)

変化していない。よって、移動限界水深に深とした堤体設置位置の選定は適切であったことになる。次に、堤体設置直後の流況を図-7 に示す。離岸堤背後中央で、離岸流となる一対の大規模な循環流が形成された。ただし、離岸堤背後中央部での離岸流速は 10 cm/s 以下と小さく、また、碎波波高も小さな値であったため、漂砂量は少ないと推定される。砂州の形成が進み地形が安定すると、離岸堤背後の中央部に流れはあまり見られず澱んだ状態となった(図-8)。流況が変化したのは、砂州の形成に伴い波の屈折状況が変化したためと考えられる。そこで、砂移動が生じないと思われる $-0.8 \text{ m} \leq X \leq 0.8 \text{ m}$ で、汀線から堤体まで長方形形状に養浜し、人為的にトンボロを形成させた。その後、17 時間波を作用させた時の等深線図を図-9 に示す。汀線は離岸堤直背後で約 10 cm 後退したが、幅約 1.4 m の安定なトンボロが存在した。このように十分に長い堤長を有する離岸堤背後には安定したトンボロが形成される。

$B=3.8$ m のケースでは $B=5.0$ m のケースとは異なり、離岸堤背後の循環流は地形安定後も離岸堤中央近くまで及び、流れが澱んでいる範囲が狭かった。静穏域と考えられた $-0.5 \text{ m} \leq X \leq 0.5 \text{ m}$ の範囲に養浜を行った後の汀線変化を図-10 に示す。養浜直後に離岸堤直背後で侵食が始まり、4 時間後には離岸堤とトンボロが離れ、9 時間後まで侵食が進んだ。このケースでは安定したトンボロは形成されなかったが、養浜砂の侵食は著しくはなく、当初の予想通り $B=3.8$ m 付近が限界堤長と考えられた。

次に、 $i=1/10$ の実験結果について述べる。限界堤

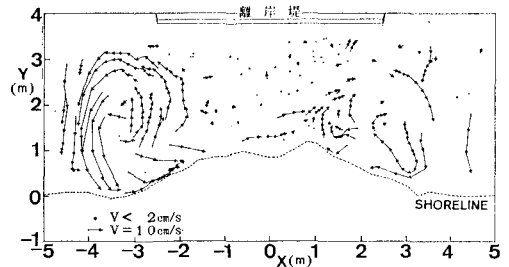


図-8 堤体設置安定後の流況 ($i=1/30$, $B=5.0$ m)

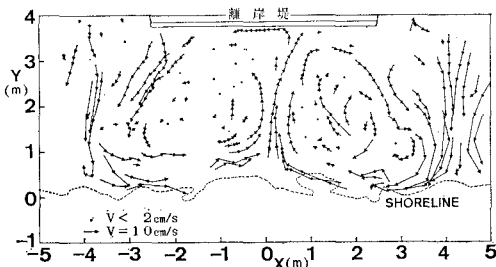


図-7 堤体設置直後の流況 ($i=1/30$, $B=5.0$ m)

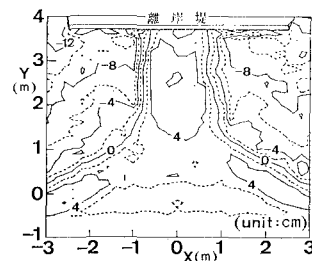


図-9 養浜後 17 時間の等深線 ($i=1/30$, $B=5.0$ m)

長と考えた、 $B=2.8\text{ m}$ のケースにおいて堤体設置後に地形が安定した時の等深線図を図-11に示す。離岸堤背後の砂州は2山となりⅢ型の砂州形状となった。養浜は砂州の各頂点付近である $X=\pm 0.8\text{ m}$ 間に長方形形状に行った。養浜後に波を作用させて、地形が安定した時の等深線図を図-12に示す。離岸堤直背後では約 0.3 m 汀線が後退したが、安定したトンボロが形成された。このケースでは限界堤長に設定した $B=2.8\text{ m}$ でもトンボ

ロが形成された。しかし、離岸堤直背後のトンボロ幅、高さ共に小さいことから、 $B=2.8\text{ m}$ が限界堤長に近いと推定される。実験における限界堤長 B_c と海滨勾配の逆数 $\cot \beta$ の関係を図-13に示す。本実験では設置水深が一定であるから $\cot \beta$ は離岸距離に置き換えられる。実験ケースは少ないが、限界堤長は離岸距離が長いほど大きくなる傾向を有すると考えられる。

5. 数値計算によるトンボロ形状の予測

実験より、ある程度の長さの堤長があれば砂を供給することにより安定したトンボロが形成されることがわかった。そこで、トンボロを形成するのに必要な限界堤長の諸元を算定するために汀線変化モデルを用いた計算手法について検討した。

碎波波高・波向の計算には波向線法を用いた。離岸堤背後は斜面であるため、回折の効果は Sommerfeld の解を利用して図-14に示すように行った。すなわち、開口部の領域については、あらかじめ離岸堤端部より出発する波向線の計算を行って各波向線上の K_D を求め、それらをメッシュデータ化した。この時波向線は屈折するため、Sommerfeld の解により K_D を求める時の位置 (r, θ) が問題になる。ここでは、離岸堤端の A 点での波速 C_A と A 点から C 点までの所要時間 t より ($r=C_A \cdot t, \theta=\theta_2$) とした。そして、入射波の波向線の計算を行い、波向線の位置よりメッシュデータを内挿して K_D を求め

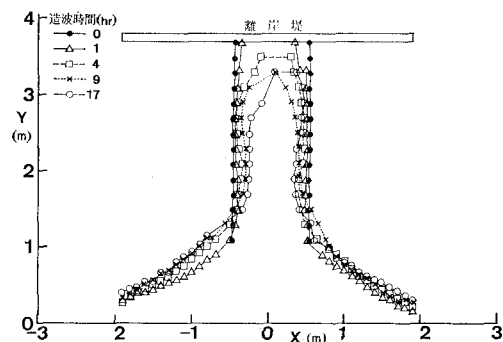


図-10 養浜後の汀線変化 ($i=1/30, B=3.8\text{ m}$)

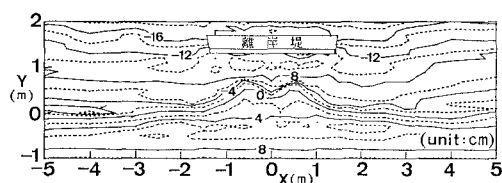


図-11 堤体設置安定後の等深線 ($i=1/10, B=2.8\text{ m}$)

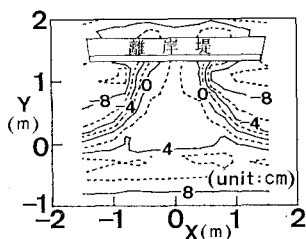


図-12 養浜後6時間の等深線 ($i=1/10, B=2.8\text{ m}$)

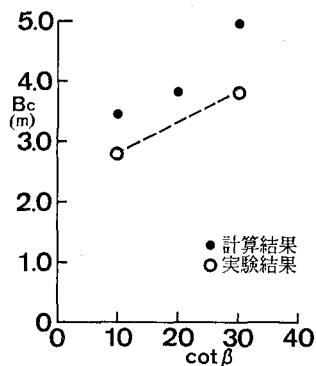


図-13 B_c と $\cot \beta$ の関係

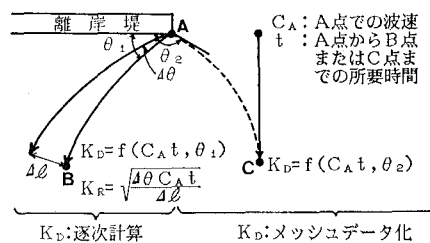


図-14 回折効果の模式図

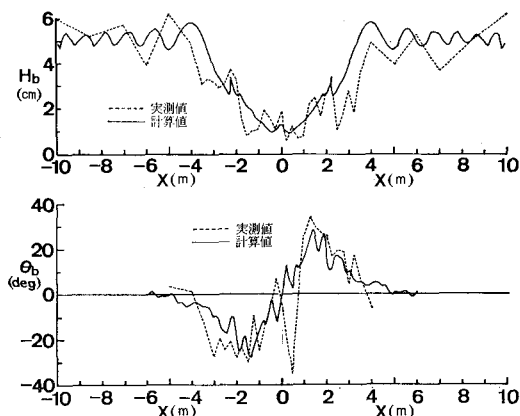


図-15 実験と計算による H_b および θ_b の比較

た。離岸堤背後については、A点より出発する各波向線毎に同じ方法で K_D を求めた。なお、この場合の屈折係数は水平床とした時の仮想波向線間隔 $\Delta\theta \cdot C_A \cdot t$ と実際の間隔 Δl の比より算出した(図-14参照)。ケースII-2における地形安定時(図-6)の碎波波高 H_b および波向 θ_b 分布を実験と計算で比較した(図-15)。 H_b は $X=\pm 4\text{ m}$ 付近で実験値より計算値がやや大きい他は、両者は良く一致しており計算がほぼ妥当であることがわかる。

トンボロの変形過程を予測する汀線変化モデルには任意曲線座標系を用いた one-line モデルを使用した³⁾。また、漂砂量公式には SPM 公式を用いた。限界堤長に近いケース II-1 の汀線変化(図-10)の再現計算結果を図-16に示す。 $Y=1.0\sim 1.5\text{ m}$ における汀線の前進、後退状況は実験と良く一致している。離岸堤直背後の $Y=2.5\sim 3.6\text{ m}$ でのトンボロの侵食状況は実験に比べ計算値の方が大きな値を示し、計算では $X=0.32\text{ m}$ で侵食が停止して地形が安定した。 $Y=3.0\sim 3.6\text{ m}$ でトンボロが侵食される状況は、打ち上げ領域における漂砂をモデル化しなければ再現できない。定量的には問題はあるものの、本モデルによりトンボロ形状の全体的な変化を予測することは可能と考えられる。

そこで、限界堤長を計算により求め、実験結果と比較した。計算は一樣勾配海岸に、海底勾配 $1/5$ で汀線と直角方向にトンボロ状の養浜をする条件で行った。養浜地形と一樣勾配海岸とは実験結果を参考にして、図-17に例示する形状に接続した。同図は海底勾配 $1/20$ のケースである。限界堤長の条件は、図-16の結果より離岸堤直背後のトンボロの幅が 32 cm となった場合とした。以上の仮定で行った計算結果を図-13に示した。計算結果の方が B_c はやや大きくなっているが、海底勾配による B_c の変化傾向は一致している。計算では海底地形の条件が実験とは異なるため定量的な一致には至らなかった。しかし、地形条件をうまく設定することができれば本計算により限界堤長の推算は可能と考えられる。

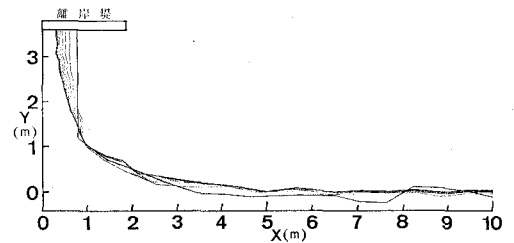


図-16 汀線形状の再現計算結果 ($i=1/30$, $B=3.8\text{ m}$)

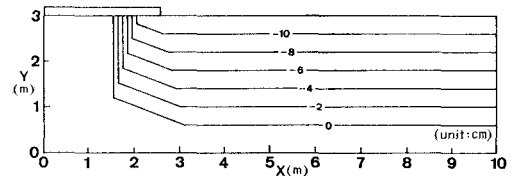


図-17 モデル計算での海浜地形 ($i=1/20$)

6. 結 論

主要な結論を以下に記す。

- ① 海底勾配 $1/10$, $1/30$ の海浜地形を対象とし、直角入射の条件の下で移動床平面実験を行った結果、トンボロを形成する限界堤長の条件が存在すること、またその条件は海底勾配 $1/10$ ではほぼ 2.8 m , $1/30$ ではほぼ 3.8 m であることがわかった。
- ② 実験結果によると、一定の波条件下では離岸距離が大きいほど限界堤長も大きくなる傾向が見られた。
- ③ 曲線座標系を用いた汀線変化モデルにより離岸堤背後のトンボロ形状変化を予測できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明・山本幸次: 海浜安定化工法に関する 2, 3 の検討, 土木技術資料, Vol. 29, No. 9, pp. 21~26, 1987.
- 2) 篠原謹爾・池用 茂: 離岸堤による砂浜変形特性, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 146~150, 1966.
- 3) 宇多高明: 新しい海浜変形モデルによる河口砂州の変形予測, 土木学会論文報告集, No. 322, pp. 77~88, 1982.